

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 65

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

1. Цель работы

Целью работы является ознакомление с устройством, физикой явлений, способами включения и некоторыми характеристиками транзистора.

2. Краткая теория

Биполярным транзистором называется полупроводниковый прибор, состоящий из трех областей с чередующимися типами проводимости и способный усиливать мощность электрических сигналов. Возможны два типа транзисторов (*p-n-p* и *n-p-n*), на рис. 1 (а, б) показаны оба типа транзисторов, а на рис. 1(в, г) их изображение в электрических схемах.

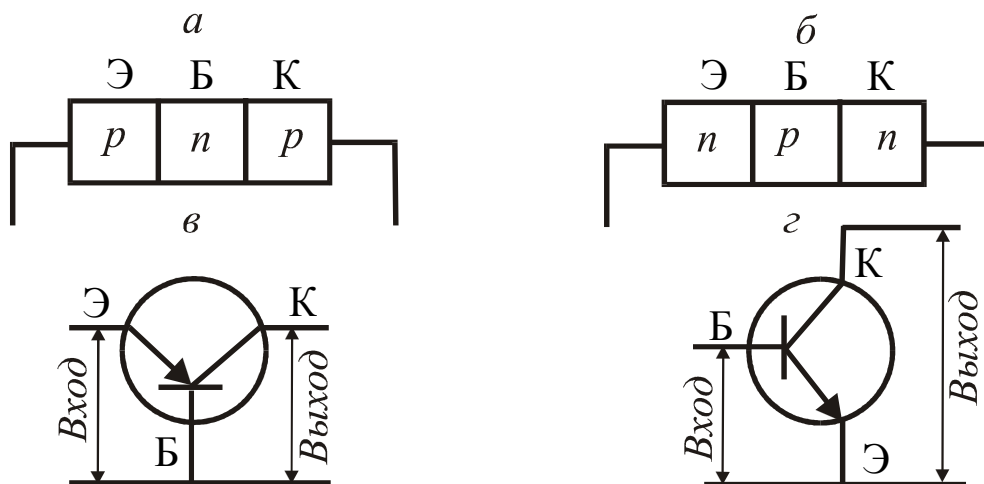


Рис. 1. Типы транзисторов

Области, из которых состоит транзистор, называются *эмиттером Э*, *базой Б*, *коллектором К*. Каждая из них имеет соответствующий вывод. Толщина базы в современных транзисторах не превышает 10 мкм, что обусловлено требованием отсутствия рекомбинационных процессов носителей заряда в базе. Напряжения к электродам транзистора подводятся таким образом, что на *p-n*-переходе эмиттер-база оно в усилительных схемах оказывается всегда прямым (пропускным), а на *p-n*-переходе база-коллектор - обратным (запирающим).

Возможны несколько способов включения транзисторов. Если общим электродом для входной и выходной цепей транзистора является

база, то такое включение называют включением по схеме с общей базой (см. рис. 1, в). Однако эта схема, как будет показано дальше, не обеспечивает усиления по току, и на практике чаще используется схема с общим эмиттером (см. рис. 1, г). Существует также схема с общим коллектором, ее особенностью является высокое входное сопротивление.

Рассмотрим физику явлений, происходящих в транзисторе, на примере транзистора *n-p-n*-типа, включенного по схеме с общей базой. В отсутствие напряжений на *p-n*-переходах энергетическая диаграмма транзистора приводится на рис. 2.

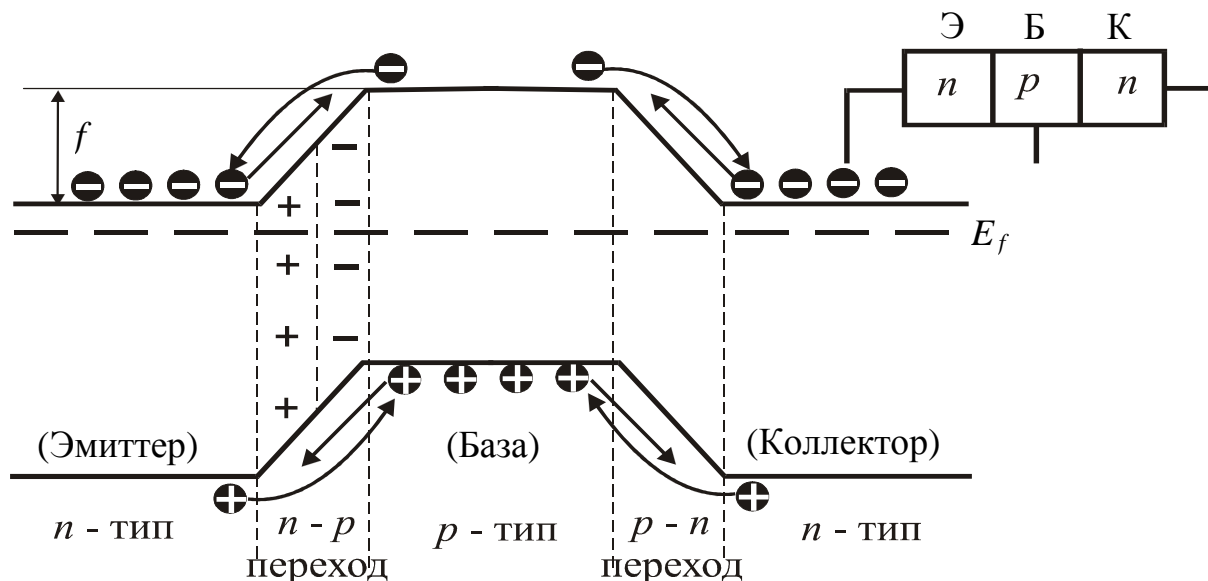


Рис. 2. Энергетическая диаграмма транзистора *n-p-n*-типа в отсутствие внешних напряжений

Энергетическая диаграмма построена в соответствии с теорией *p-n*-перехода. Через контакт эмиттера *n*-типа с базой *p*-типа возникает диффузия основных носителей - электронов из эмиттера в базу, дырок - в обратном направлении. При этом заряжаются приконтактные области: область со стороны базы - отрицательно, область со стороны эмиттера - положительно. Это обуславливает смещение энергетических уровней эмиттера и базы относительно друг друга и возникновение на образовавшемся *p-n*-переходе потенциального барьера высотой

$$\varphi = q_e U_k, \quad (1)$$

где q_e - заряд электрона;

U_k - контактная разность потенциалов между эмиттером и базой.

Потенциальный барьер препятствует дальнейшему переходу через контакт основных носителей - электронов из эмиттера и дырок из базы.

При наличии потенциального барьера возможностью перехода обладают основные носители, имеющие энергию более величины $q_e U_k$. Количество таких носителей мало. Их исток образует диффузионный ток, направленный от базы к эмиттеру.

Неосновные носители (дырки в эмиттере, электроны в базе) также движутся через $p-n$ -переход, причем их поток противоположен потоку основных носителей. Причиной их движения является контактная разность потенциалов, поток неосновных носителей образует дрейфовый ток, направленный из эмиттера в базу. В отсутствие внешних напряжений диффузионный и дрейфовый токи уравниваются, результирующий ток через $p-n$ -переход равен нулю. Рассмотренные выше процессы движения носителей тока через $p-n$ -переход показаны стрелками на рис. 2. Здесь же штриховой линией изображено положение уровня Ферми (E_f).

Аналогичные явления происходят на контакте коллектор-база, и энергетическая диаграмма транзистора $n-p-n$ -типа в условиях равновесия приобретает форму выступа, обращенного вверх. Для транзистора $p-n-p$ -типа выступ обращен вниз.

При работе транзистора на эмиттерный $p-n$ -переход (эмиттер-база) подается постоянное напряжения порядка десятых долей вольта в прямом направлении, на коллекторный переход (база-коллектор) - постоянное напряжение до 10 В в обратном направлении. При этом высота потенциального барьера на эмиттерном переходе понижается, на коллекторном переходе увеличивается, а энергетическая диаграмма приобретает вид, показанный на рис. 3.

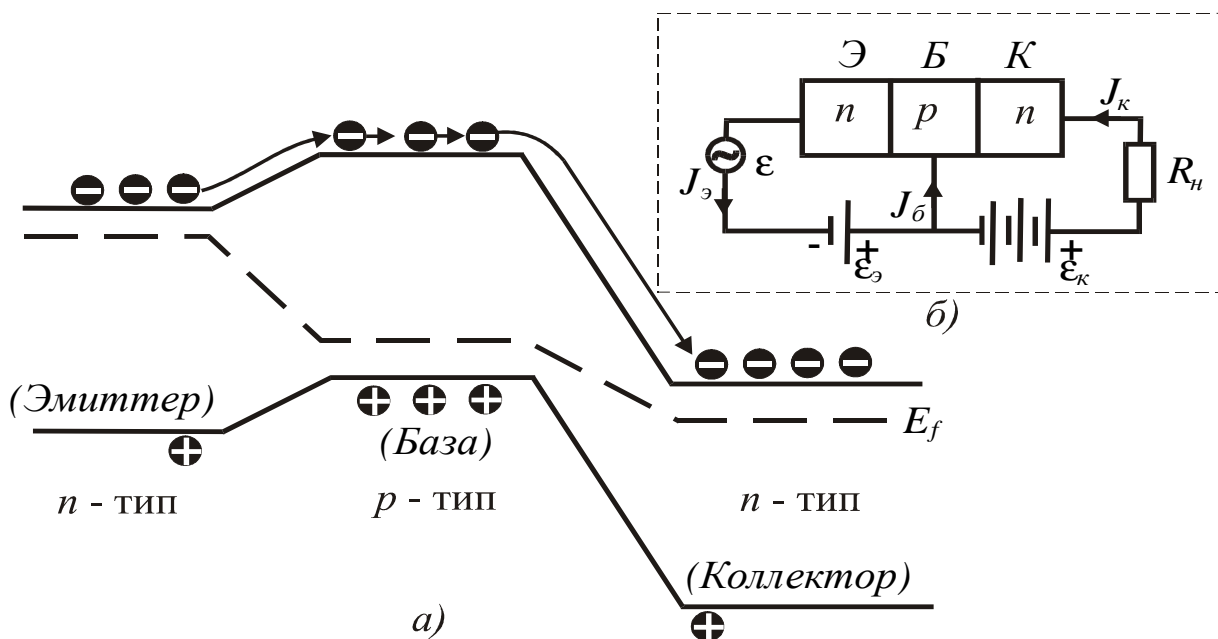


Рис. 3. Энергетическая диаграмма транзистора $n-p-n$ -типа в усилительном режиме

Понижение высоты эмиттерного барьера резко увеличивает диффузионные потоки основных носителей через переход, оставляя неизменными дрейфовые потоки неосновных носителей.

Результирующий ток оказывается отличным от нуля.

В транзисторах база легирована примесями значительно слабее, концентрация основных носителей в ней много меньше, чем в эмиттере и коллекторе. По этой причине результирующий ток через переход эмиттер-база определяется потоком основных носителей эмиттера (в транзисторе *n-p-n*-типа это электроны, в транзисторе *p-n-p*-типа - дырки). Основные носители эмиттера, попав в базу, становятся неосновными.

Появление в базе неосновных носителей при протекании прямого тока через эмиттерный переход называется *инжекцией* (впрыскиванием). Инжектированные в базу носители (в нашем случае электроны) движутся в ней по всем направлениям, при этом часть из них рекомбинирует с основными носителями в базе – дырками. Остальные, дойдя до коллекторного перехода, увлекаются коллекторным полем в коллектор, создавая ток I_K .

Поскольку толщина базы мала и концентрация основных носителей в ней много меньше концентрации неосновных, то большинство (~99 %) электронов, инжектированных в базу, доходят до коллекторного перехода, не рекомбинируя, а ток коллектора может достигать 0,995 значения тока эмиттера I_E . Поток дырок из базы в эмиттер создает очень небольшой ток базы I_B .

Изменение тока эмиттера ΔI_E вызывает изменение тока коллектора ΔI_K , при этом коэффициент усиления по току в схеме с общей базой

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \approx 0,99 . \quad (2)$$

Включенный по схеме с общим эмиттером (общей базой) транзистор с цепями питания и нагрузочным сопротивлением R_H называется *усилительным каскадом* (рис. 3, б). Коэффициент усиления по напряжению при этом определяется отношением изменения напряжения на R_H к изменению напряжения на входе (эмиттере).

$$K = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_E} . \quad (3)$$

Поскольку $\Delta I_K = \Delta I_E$, то $\Delta U_{\text{вых}} \gg \Delta U_{\text{вх}}$ и $K \gg 1$.

Рассмотрим действие транзистора в схеме с общим эмиттером (рис.4). Как и в схеме с общей базой, эмиттерный переход включен в

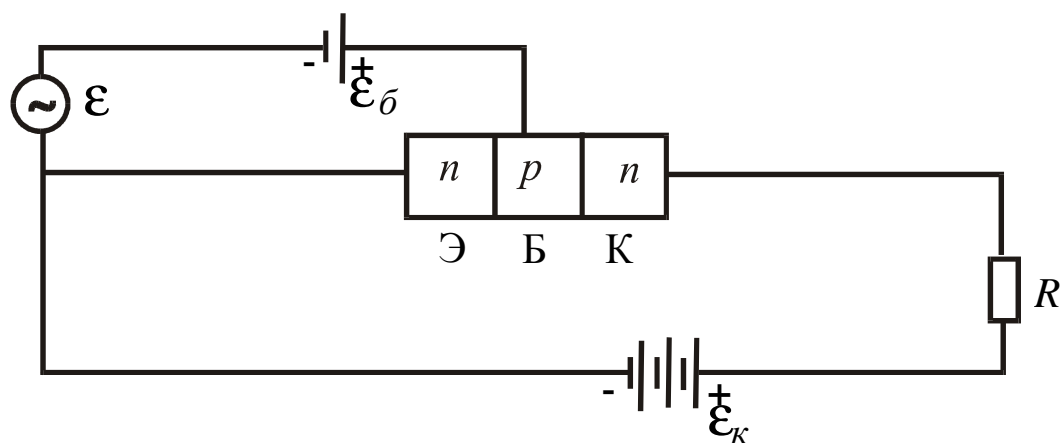


Рис. 4. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером

прямом направлении, коллекторный переход - в обратном, поэтому основное падение напряжения источника тока E_K сосредоточено на коллекторном переходе. Поэтому принципиальных изменений в энергетической диаграмме транзистора при данном способе включения нет. Ток коллектора, как и ранее, определяется количеством электронов, инжектированных в базу из эмиттера.

Количество инжектированных в базу электронов будет регулироваться напряжением источников E_B , ε , которое будет менять высоту потенциального барьера на $p-n$ -переходе эмиттера. Большая часть электронов, попавших в базу из эмиттера, переходит в область коллектора, и только малая часть уходит в цепь базы, создавая небольшой ток базы I_B по сравнению с током I_K .

Ток базы при данном способе включения является входным током. Его изменение, обусловленное изменением напряжения на переходе эмиттер-база, влечет за собой изменение тока коллектора. Изменение тока базы ΔI_B и изменение тока коллектора ΔI_K приблизительно пропорциональны самим токам, и поэтому коэффициент усиления по току

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \approx \frac{I_K}{I_B} \gg 1. \quad (4)$$

Коэффициенты усиления по току в схемах с общим эмиттером общей базой связаны соотношением

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (5)$$

Коэффициент усиления K по напряжению определяется аналогично включению транзистора по схеме с общей базой, а коэффициент усиления по мощности оказывается при этом много больше.

3. Выполнение работы

3.1. Необходимые приборы: стенд для снятия характеристик транзистора, транзистор *n-p-n*-типа, источники питания 1 и 10 В.

На рис. 5 показано возможное включение электроизмерительных приборов. Как и в работе № 64 (смотри описание стенда), на стенде предусмотрено выполнение работы в двух режимах.

Первый с помощью контактного поля, когда гнезда контактного поля соединяют с помощью специальных проводников со штекерами, при этом переключатель режимов устанавливают в положение **0**.

Второй режим использует готовую собранную схему, специальные проводники не подключаются, необходимо лишь установить в разъем транзистор и переключатель режимов в соответствующее положение **3** (при этом измеряется зависимость тока базы I_B от напряжения $U_{ЭБ}$ при $I_K = \text{const}$) или **4** (измеряются зависимость тока коллектора I_K от напряжения на коллекторе U_K при $I_B = \text{const}$ и зависимость тока коллектора I_K от тока базы I_B при $U_K = \text{const}$).

В **первом** режиме используемое контактное поле (четыре ряда нижних гнезд) позволяет изучить все возможные характеристики транзистора, которые в общем случае подразделяются на входные (зависимость тока базы I_B от напряжения $U_{ЭБ}$ при $I_K = \text{const}$); выходные (зависимость тока коллектора I_K от напряжения на коллекторе U_K при

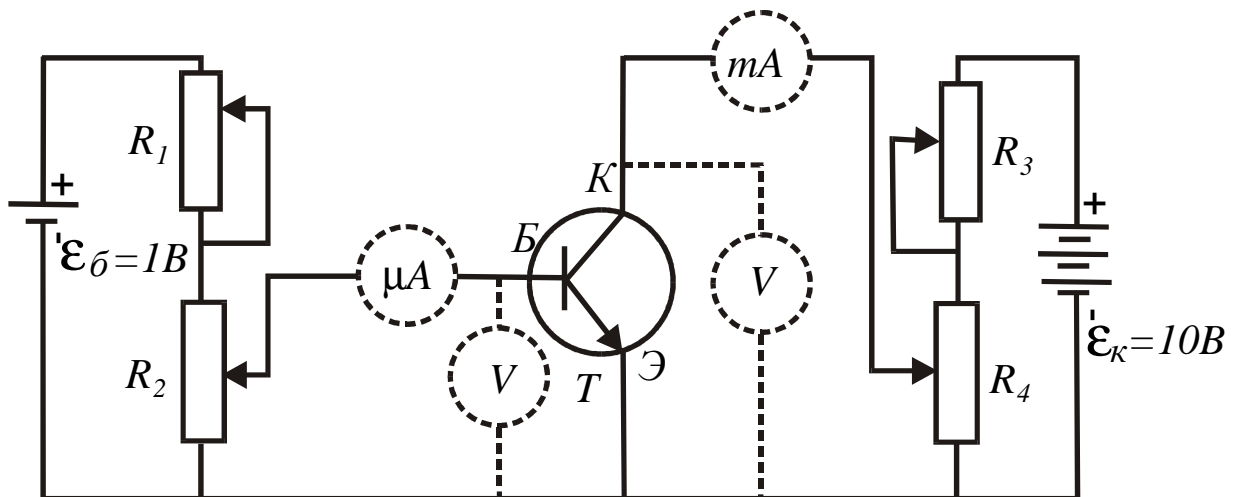


Рис. 5. Электрическая схема для снятия характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером

R_2, R_4 - потенциометры грубой регулировки напряжения;
 R_1, R_3 - потенциометры плавной регулировки напряжения;
 E_K, E_B - источники тока цепи коллектора и базы; Т – транзистор

$I_B = \text{const}$), проходные или сквозные (зависимость тока коллектора I_K от тока базы I_B при $U_K = \text{const}$, позволяющая оценить коэффициент усиления по току). Для снятия этих характеристик необходима рабочая электрическая схема с использованием контактного поля, приведенная на рис. 6.

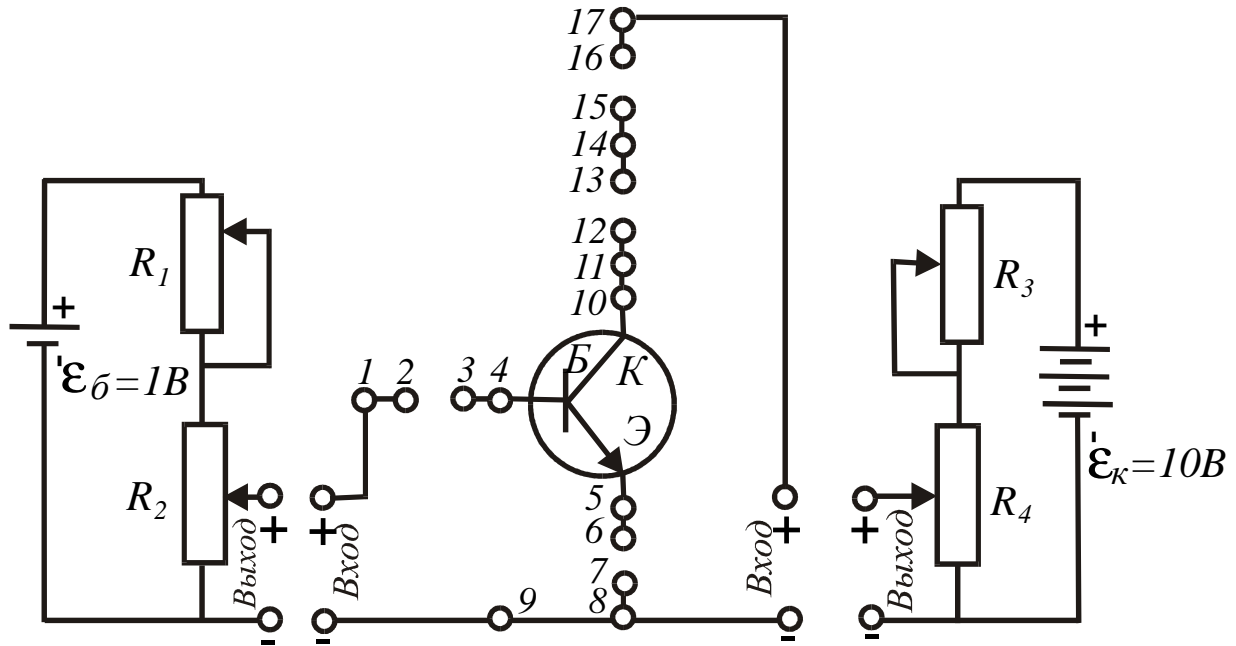


Рис. 6. Рабочая электрическая схема:
 выход - выходные гнезда блоков питания 1 и 10 В;
 вход - входные гнезда измерительного блока 1 и 10 В.

3.2. Исследование характеристики $I_B = f(U_{ЭБ})$ при $U_K = 0$

Устанавливают потенциометры регулировки напряжения "грубо" и "плавно" в крайнее левое положение, соответствующее минимуму напряжения. На микроамперметре устанавливают предел 500 мкА, на миллиамперметре предел 3 мА.

Режим работы выбирает преподаватель.

Во втором режиме устанавливают переключатель режима работы в положение 3, и снимают зависимость $I_B = f(U_{ЭБ})$. Данные измерений записывают в табл. 1.

В первом режиме собирают схему согласно рис. 6, соединив проводниками гнезда выхода источников питания с соответствующими по знаку гнездами входа измерительного блока. Устанавливают на вольтметре предел измерений 1 В, включают его при помощи соединительных проводников в гнезда 1 и 5 контактного поля. Микроамперметр подключают к гнездам 2 - 3 контактного поля,

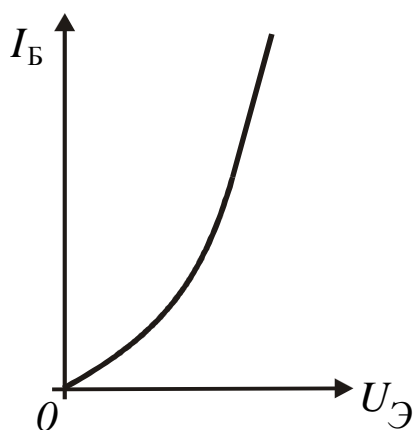
миллиамперметр подключают к гнездам 12 - 13. Разрывы цепи между гнездами 6 - 7, 15 - 16 замыкают проводниками. После проверки схемы преподавателем включают тумблер "сеть".

Меняя напряжение, подаваемое на переход эмиттер - база, снимают зависимость $I_B = f(U_{ЭБ})$. Данные измерений записывают в таблицу 1.

Таблица 1

Зависимость тока базы от напряжения $U_{ЭБ}$ при $U_K = 0$

$U_{ЭБ},$ мВ	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$I_B,$ мкА									



По полученным значениям строят график зависимости $I_B = f(U_{ЭБ})$.

при $U_K = 0$ и сравнивают его с теоретическим, приведенным на рис. 7.

Рис. 7. График зависимости $I_B = f(U_{ЭБ})$ при $U_K = 0$

3.3. Исследование характеристики $I_K = f(I_B)$ при $U_K = 7$ В

Устанавливают потенциометры регулировки напряжений в крайнее левое положение, выключают тумблер "сеть". По мере необходимости меняют пределы измерения миллиамперметра, начав с минимального в 1 мА. Опыт заканчивают при достижении тока коллектора в 20 мА.

Во втором режиме устанавливают переключатель режима работы в положение 4, и снимают зависимость $I_K = f(I_B)$, поддерживая постоянным напряжение $U_K = 7$ В. Данные измерений записывают в табл 2.

В первом режиме (положение переключателя режима работы 0) производят переключения в схеме. Микроамперметр и миллиамперметр оставляют на прежних местах, вольтметр подключают к гнездам 5 - 10 контактного поля, переключив предел измерений на 30 В.

Предлагают проверить схему преподавателю.

Включают тумблер "сеть", потенциометрами R_3, R_4 устанавливают напряжение на коллекторе 7 В и в дальнейшем поддерживают его постоянным дополнительной регулировкой.

Потенциометрами R_1, R_2 задают различные токи базы и снимают характеристику $I_K = f(I_B)$. Данные измерений записывают в табл. 2. После записи последнего значения уменьшают токи до нуля и выключают тумблер "сеть".

Таблица 2

Зависимость тока коллектора от тока базы при $U_K = 7$ В

I_B , мкА	0	50	100	150	200	250	300	350
I_K , мА								

По полученным значениям строят график зависимости $I_K = f(I_B)$ при $U_K = 7$ В, сравнивают его с теоретическим (рис. 8) и вычисляют коэффициент усиления по току по формуле (4).

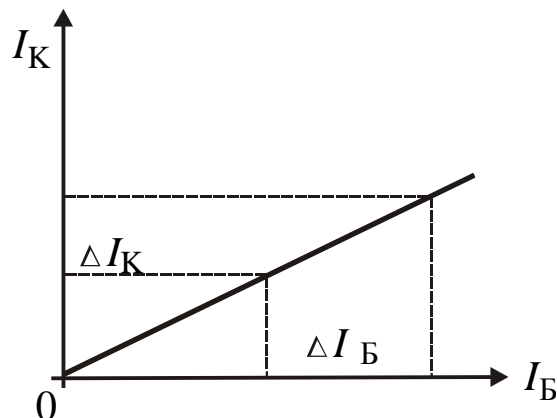


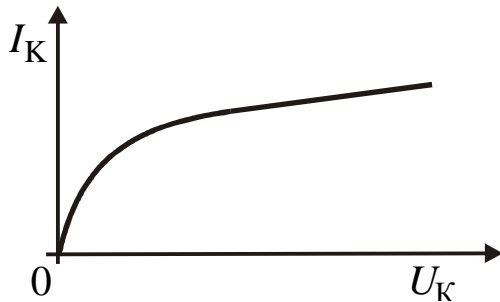
Рис. 8. График зависимости $I_K = f(I_B)$ при $U_K = 7$ В

3.4. Исследование характеристики $I_K = f(U_K)$ при $I_B = 200$ мкА

И в первом, и во втором режимах используются такие же установки, как и в пункте 3.3. Устанавливают потенциометры регулировки напряжений в крайнее левое положение. Устанавливают следующие пределы электроизмерительных приборов: на микроамперметре 500 мкА, миллиамперметре 30 мА, вольтметре 10 В. С помощью потенциометров R_1, R_2 устанавливают базовый ток 200 мкА и в дальнейшем поддерживают его неизменным. Меняя напряжение на коллекторе, снимают зависимость $I_K = f(U_K)$ до значений I_K , не превышающих 20 мА. Данные измерений записывают в табл. 3, после чего все напряжения и токи снижают до нуля и выключают тумблер "сеть".

**Зависимость тока коллектора от напряжения коллектора
при $I_B = 200$ мкА**

$U_K, В$	0,0	0,4	0,8	1,2	2,0	4,0	6,0	8,0
$I_K, мА$								



По полученным данным строят график зависимости $I_K = f(U_K)$ при $I_B = 200$ мкА, сравнивают его с теоретическим, изображенным на рис. 9.

Рис. 9. График зависимости $I_K = f(U_K)$
при $I_B = 200$ мкА

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой транзистор, каковы типы транзисторов, их условное обозначение в схемах?
2. Каковы способы включения транзисторов в электрические цепи?
3. Нарисуйте энергетические диаграммы транзистора в отсутствие внешних напряжений, при наличии внешних напряжений.
4. Поясните протекание тока через транзистор.
5. Что представляют собой коэффициенты усиления по току и напряжению?
6. В чем преимущество включения транзистора с общим эмиттером?
7. Начертите электрическую схему включения транзистора с общими базой и эмиттером.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бушманов, Б. Н., Хромов, Ю. А.* Физика твердого тела / Б. Н. Бушманов, Ю. А. Хромов.- М.: Высш. школа, 1971.- 224 с.
- Лысов, В. Ф.* Практикум по физике полупроводников / В. Ф. Лысов.- М.: Просвещение, 1976.- 207 с.